

0. 784383

На правах рукописи



БОГОСЛОВ ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**СТАБИЛИЗАЦИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА
ВРАЩАЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

**Специальность 05.12.04 - радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Казань 2010

**Работа выполнена на кафедре Радиоэлектронных и квантовых устройств
Казанского государственного технического университета
им. А.Н. Туполева**

**Научный
руководитель:**

к.т.н., доцент Данилас Максим Петрович

**Официальные
оппоненты:**

**д.ф.-м.н., профессор Рябова Наталья Владимировна, зав.
каф. Радиотехники и связи Марийского
государственного технического университета,**

**к.т.н., доцент Асадуллин Тимур Ясавеевич, доцент каф.
Общей физики Казанского государственного
технического университета им.А.Н.Туполева**

**Ведущая
организация:**

**Казанский филиал ФГУП «ПО«Уральский оптико-
механический завод»**

**Защита состоится 15 октября 2010 г. в 14 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.079.04 при Казанском государственном
техническом университете им. А.Н. Туполева по адресу: г. Казань, ул. Карла
Маркса, д. 31.**

**С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского
государственного технического университета им. А.Н. Туполева по адресу:
420111, г. Казань, ул. К.Маркса, 10**

**С авторефератом диссертации можно ознакомиться на сайте КГТУ
им. А.Н. Туполева www.kai.ru.**

Автореферат разослан 10 сентября 2010 г.

**Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент**

С.С. Седов

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГТУ



0000728494

С.С. Седов

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В последние годы внимание большого числа ученых как в России, так и за рубежом сосредоточено на изучении широкого круга проблем, связанных с анализом и стабилизацией требуемого режима поведения (регулярного или стохастического) сложных динамических систем. Особую роль в изучении этих проблем сыграли исследования по стабилизации газовых разрядов и параметров выходного излучения газовых лазеров. Одним из важнейших вопросов, решаемых на данном этапе исследований, является вопрос повышения КПД и обеспечения требуемых параметров технологических плазменных и лазерных установок (например, однородное распределение плотности зарядов в разрядной камере, максимальный удельный энерговыдел в газовый разряд), использующих различные типы газовых разрядов. Исследования, направленные на повышение эффективности технологических плазменных и лазерных установок стимулировали развитие разрядных камер сложной конфигурации (щелевая, Н-волноводная, коаксиальная). Для большого числа практических применений газовых разрядов в различных технологиях требуется обеспечение однородного и устойчивого распределения зарядов в разрядной камере. Получение газового разряда с однородным распределением зарядов по всему объему разрядной камеры сложной конфигурации осложняется развитием неустойчивостей, которые приводят к изменению структуры разряда и его контракции. Поэтому возникает необходимость в использовании дополнительных мер по стабилизации газовых разрядов в разрядных камерах сложных конфигураций. В настоящее время известно большое количество методов стабилизации газовых разрядов, которые возможно разделить на пассивные и активные. К пассивным методам стабилизации газовых разрядов относятся, например: секционирование электродов и нагрузка их балластными сопротивлениями, к активным – предыонизация разряда, турбулизация потока и/или локальное газодинамическое воздействие (например, газовой струей) на критические области разряда, стабилизация электромагнитными полями. Существующие методы стабилизации газовых разрядов, используемые на практике, способны обеспечивать требуемые характеристики и параметры устройств и технологических установок (в том числе и КПД). Однако в литературе отсутствуют рекомендации по выбору системы стабилизации газовых разрядов для конкретной конструкции разрядной камеры и области их применения.

Необходимо отметить, что разработкой и совершенствованием систем стабилизации газовых разрядов занимаются многие коллективы специалистов, как в России, так и за рубежом. Так, например, вопросам исследований динамических методов стабилизации газовых разрядов посвящены работы В.В.Афанасьева, Е.П.Велихова, Н.А.Генералова, Р.А.Демирханова, С.И.Михайлова, О.Я.Новикова, Ю.Е.Польского, В.Ф.Путько, Ю.П.Райзера,

А.Т.Рахимова, Б.А.Тимеркаева. Из работ зарубежных специалистов следует выделить труды ряда научно исследовательских институтов США, Германии, Японии. Предварительный анализ этих исследований показал, что существуют возможности дальнейшего увеличения эффективности систем стабилизации газовых разрядов за счет использования инерциальных стабилизирующих воздействий. Однако в литературе до сих пор отсутствуют сведения о проведении экспериментальных исследований, направленных на уточнение параметров внешних стабилизирующих воздействий на газовый разряд в разрядных камерах сложных конфигураций.

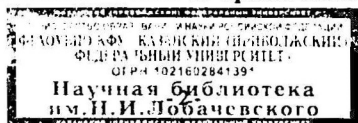
В настоящее время возможно выделить три подхода к выбору параметров системы стабилизации газовых разрядов: подход с использованием метода «грубой силы», подход, основанный на введении следящей отрицательной обратной связи, подход с использованием метода инерциальных воздействий. Наиболее эффективным, с точки зрения снижения энергозатрат на стабилизацию, является подход с использованием метода инерциальных воздействий. Основным ограничением его применимости является выбор периода воздействия T_c , который должен быть меньше всегда отличного от нуля времени развития неустойчивости τ в реальной плазме. Метод инерциальных воздействий дает возможность стабилизировать динамическую систему с большим числом мод и не требует учета детальных параметров каждого конкретного типа колебаний в газовом разряде. Эффективность данного метода стабилизации доказана теоретически, однако для разработки рекомендаций по выбору систем стабилизации газовых разрядов и подтверждения ранее полученных результатов необходимо проведение экспериментальных исследований по стабилизации газового разряда вращающимся магнитным полем.

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью экспериментального подтверждения эффективности инерциальных стабилизирующих воздействий на газовый разряд в разрядных камерах сложных конфигураций и разработки рекомендаций по практическому применению этого вида стабилизирующих воздействий.

Предметом исследования является способ и система стабилизации самостоятельного газового разряда вращающимся магнитным полем.

Объектом исследования является самостоятельный газовый разряд с однородным распределением зарядов в разрядной области коаксиальной камеры.

Целью работы является повышение эффективности стабилизации газового разряда в разрядной камере коаксиальной конфигурации вращающимся магнитным полем и выявление областей практического использования этого метода стабилизации.



Основные задачи диссертационной работы

1. На базе сопоставительного анализа систем стабилизации выявить наиболее эффективные системы стабилизации газового разряда в разрядных камерах сложных конфигураций.

2. Определить параметры стабилизирующего вращающегося магнитного поля, частота которого принадлежит области инерциальных воздействий, на базе математической модели самостоятельного газового разряда в разрядной камере коаксиальной конфигурации.

3. Разработать структурную схему и определить параметры системы стабилизации самостоятельного газового разряда вращающимся магнитным полем в разрядной камере коаксиальной конфигурации.

4. Провести экспериментальные исследования стабилизации газового разряда вращающимся магнитным полем, направленные на оценку эффективности системы стабилизации и инерциальных стабилизирующих воздействий.

5. Выявить области практического применения различных систем стабилизации газовых разрядов в разрядных камерах сложной конфигурации.

Методы исследования

Для достижения поставленных целей в работе использованы математические методы теоретической радиоэлектроники, физики плазмы и методы экспериментальной физики.

Достоверность и обоснованность результатов определяются корректностью используемых математических моделей и их адекватностью реальным физическим процессам; совпадением теоретических результатов с данными экспериментов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты оценки параметров системы стабилизации вращающимся магнитным полем, обеспечивающей однородность и устойчивость газового разряда в коаксиальной разрядной камере.

2. Реализация блоков структурной схемы системы стабилизации вращающимся магнитным полем.

3. Результаты экспериментальных исследований стабилизации самостоятельного газового разряда вращающимся магнитным полем.

4. Рекомендации по использованию систем стабилизации газового разряда в технологических процессах и установках.

Научная новизна

1. Получены теоретические оценки параметров стабилизирующего вращающегося магнитного поля (частота вращения и напряженность), позволяющие обеспечить однородность газового разряда в коаксиальной разрядной камере.

2. Определены требования к системе стабилизации газового разряда вращающимся магнитным полем в разрядной камере коаксиальной конфигурации и разработана структурная схема системы стабилизации.

3. Экспериментально подтверждены теоретические оценки параметров стабилизирующего вращающегося магнитного поля (частота вращения и напряженность) и эффективность инерциальных стабилизирующих воздействий.

4. Выявлены области практического применения часто используемых на практике систем стабилизации газового разряда на базе их сопоставительного анализа.

Практическая ценность полученных результатов

Использование разработанной системы стабилизации самостоятельного газового разряда вращающимся магнитным полем в разрядной камере коаксиальной конфигурации позволяет улучшить энергетические характеристики плазменных и лазерных технологических установок. Конкретный результат, достигаемый при использовании метода стабилизации газового разряда вращающимся магнитным полем и рекомендаций, содержащихся в материалах диссертации, состоит в возможности:

- увеличения предельного энерговклада в однородный самостоятельный газовый разряд до 10 Вт/см^3 ;
- снижения энергозатрат на стабилизацию самостоятельного газового разряда до 10% от мощности, вкладываемой постоянным электрическим полем и повышения эффективности использования самостоятельного газового разряда в плазмотронах, газоразрядных лампах и технологии обработки материалов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научной студенческой конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам “Научному прогрессу – творчество молодых”, Йошкар-Ола, 2007г.; VI Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов», Казань, 2007г.; Международных молодежных научных конференциях XIV и XV «Туполевские чтения», Казань, 2006, 2007 г.г.; XIV международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, 2008г.; VIV международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций». Казань, 2008.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 1 статья в журнале, входящего в перечень рекомендованных ВАК, 1 патент на изобретение, 1 патент на полезную модель, 7 тезисов докладов.

Использование результатов диссертации и пути дальнейшей реализации. Результаты работы использовались при выполнении:

1.НИР 209.05.01.34 «Управление регулярными и хаотическими колебаниями в нелинейных радио- и оптоэлектронных системах при помощи инерциальных воздействий», Научно-техническая программа «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники»: программа 209.Информационные-телекоммуникационные технологии, раздел 209.05. Теория и техника обработки и формирования сигналов в радиотехнических системах, гос. регистрац. №01.2.00308758;

2.проекта РФФИ №06-08-00848а «Диагностика технического состояния нелинейных радиоэлектронных, оптоэлектронных и квантовых систем с динамическим хаосом»;

3.государственного контракта на выполнение НИОКР по проекту № 7981 по теме: "Исследование способа стабилизации плазмы газового разряда переменным магнитным полем в коаксиальной разрядной камере " от 15.11.2007 в рамках программы "У.М.Н.И.К." - "Участник Молодежного Научно-Инновационного Конкурса" фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере;

4.проекта РФФИ №10-08-00178а «Прогнозирование отказов и повышение надежности радиоэлектронных и квантовых устройств и систем с хаотической динамикой».

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 84 наименования, и приложения. Работа без приложения изложена на 123 страницах машинописного текста, включая 34 рисунка и 15 таблиц.

Сведения о личном вкладе автора. Автором проводился сравнительный анализ методов стабилизации газовых разрядов, разработка математических моделей, позволяющих определить параметры внешнего инерциального стабилизирующего воздействия (напряженность и частоту вращающегося магнитного поля). Принимал непосредственное участие в разработке и создании экспериментальной установки, планировании, подготовке и проведении экспериментальных исследований, автором проведены обработка и анализ полученных расчетных и экспериментальных результатов, сделаны выводы, на основании которых предложены рекомендации по практическому применению системы стабилизации газового разряда вращающимся магнитным полем в плазменных технологических установках.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы и необходимость проведения диссертационных исследований. Сформулирована цель работы, представлены основные защищаемые положения, показана научная новизна и практическая значимость работы. Описана структура диссертации и приведено её краткое содержание.

В первой главе проведен сравнительный анализ основных типов газовых разрядов применяемых в разрядных камерах сложных конфигураций и методов их стабилизации. Проведенный анализ показал, что при использовании самостоятельного газового разряда фактически в любых конструкциях разрядных камер возникает необходимость в дополнительных мерах по стабилизации разряда. Наиболее часто в разрядных камерах сложных конфигураций требуется обеспечить однородное распределение зарядов по всему объему разрядной области. Показано, что обеспечить данное требование с наибольшей эффективностью позволяет стабилизация электромагнитными полями.

Сформулированы и обоснованы основные требования, предъявляемые к системам стабилизации, газового разряда. Показано, что основным критерием при разработке систем стабилизации является минимизация энергетических затрат. Наиболее эффективным, с точки зрения снижения энергозатрат на стабилизацию, является подход с использованием метода инерциальных воздействий. Имеющиеся теоретические оценки эффективности инерциальных стабилизирующих воздействий носят качественный характер и нуждаются в уточнении. Поэтому целесообразным является экспериментальное подтверждение эффективности инерциальных стабилизирующих воздействий с точки зрения снижения энергозатрат на стабилизацию. Данный метод стабилизации в разрядной камере коаксиальной конфигурации возможно реализовать путем создания поперечного вращающегося магнитного поля.

Таким образом, для обеспечения однородного распределения зарядов по всему объему разрядной области в разрядной камере коаксиальной конфигурации целесообразно использовать поперечное вращающееся магнитное поле частота вращения которого принадлежит области инерциальных воздействий.

Во второй главе приведена оценка параметров стабилизирующего вращающегося магнитного поля (частоты вращения и напряженности) в разрядной камере коаксиальной конфигурации.

Для оценки частоты вращения стабилизирующего вращающегося магнитного поля, принадлежащей области инерциальных воздействий, определялось характерное время развития ионизационно-перегревной неустойчивости, вносящей наибольший вклад в дестабилизацию самостоятельного газового разряда. Для этого использовалась стандартная

процедура исследования на устойчивость однородного стационарного состояния системы, которое определяется параметрами $n_e^{(0)}$, $T_e^{(0)}$, $T^{(0)}$, $N^{(0)}$. Исходными уравнениями, описывающими эволюцию концентрации молекул газа N , скорости v и его температуры T , являются газодинамические уравнения непрерывности, уравнения движения и энергии:

$$\begin{aligned}\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(Nv)}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{1}{NM} \frac{\partial p}{\partial y}, \\ \frac{\gamma}{\gamma-1} N \left[\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p}{N} \right) + v \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{p}{N} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial t} - v \frac{\partial p}{\partial y} &= \sigma E^2 - Q_T\end{aligned}\quad (1)$$

Линеаризация уравнений (1) позволила получить дисперсионное уравнение для определения инкремента развития неустойчивости $\omega(k)$, корни которого равны:

$$\omega_1 = -\frac{\sqrt{3}}{2}(S_+ - S_-) + \frac{i}{2}(S_+ + S_-), \omega_2 = +\frac{\sqrt{3}}{2}(S_+ - S_-) + \frac{i}{2}(S_+ + S_-), \omega_3 = -i(S_+ + S_-),$$

$$\text{где } S_{\pm} = q \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{kc_s}{q} \right) \pm \left[\frac{1}{27} \left(\frac{kc_s}{q} \right)^6 + \frac{1}{4} \left(\frac{kc_s}{q} \right)^4 \right]^{1/2} \right\}, \quad q = \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{\sigma^{(0)} E^2}{p} \frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial(\ln N)}.$$

Для самостоятельного газового разряда в разрядной камере коаксиальной геометрии наибольший вклад в развитие неустойчивости вносят коротковолновые возмущения, при которых инкремент будет максимальным ($i\omega_3/q \rightarrow 1$). Тогда инкремент $\Omega_{\text{инк макс}}$ наиболее быстро развивающихся возмущений будет равен:

$$\Omega_{\text{инк макс}} = |q| = \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{\sigma^{(0)} E^2}{p} \frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial(\ln N)} = v_r^0 \hat{v}_i, \quad (2)$$

$$\text{где } v_r^0 = \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{\sigma^{(0)} \cdot E^2}{p}, \quad \hat{v}_i = \frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial(\ln N)}$$

Для выполнения условия инерциальности воздействия, необходимо обеспечить вращение внешнего стабилизирующего магнитного поля с частотой $\Omega > \Omega_{\text{инк макс}}$.

Численные оценки характерного времени развития ионизационно-перегревной неустойчивости ($\tau = 0,15 \pm 0,8$ мс) проводились для самостоятельного газового разряда, применяемого, например, в плазматронах или коаксиальных газовых лазерах – давление $p = 1 \pm 10$ Тор, приведенная напряженность электрического поля $E/p = 5 \pm 70$ В/(см·Тор), проводимость $\sigma = 1 \pm 30$ мСм. Таким образом, частота вращения магнитного поля должна быть больше $\Omega > 7$ кГц.

Для оценки напряженности вращающегося магнитного поля, позволяющего получить однородное горение газового разряда в разрядной камере коаксиальной конфигурации использовалось магнитогидродинамическое приближение плазмы:

$$\nabla p \vec{v} = 0 \quad ((3))$$

$$\rho(\vec{v}\vec{\nabla})\vec{v} + \nabla(p + \frac{2}{3}\eta\nabla\vec{v}) = \vec{j} \times \mu_0 \vec{H}$$

В системе (3) используются следующие обозначения: ρ – плотность плазмы; p – газокINETическое давление плазмы; \vec{v} – скорость движения плазмы; \vec{H} – напряженность магнитного поля; \vec{j} – плотность текущего в плазме тока; η – динамический коэффициент вязкости, μ_0 – магнитная постоянная.

Система уравнений (3) решалась при следующих допущениях:

- пренебрегаем пристеночными эффектами в разрядной камере и считаем скорость частиц газового разряда вдоль радиуса постоянными,
- пренебрегаем изменениями скорости частиц плазмы газового разряда вдоль направления вращения вектора напряженности магнитного поля.

С учетом этих допущений было получено выражение для оценки амплитуды напряженности стабилизирующего вращающегося магнитного поля, которое имеет вид:

$$H \geq \frac{\eta \cdot \Omega}{\sigma \cdot E \cdot R \cdot \mu_0} \quad ((4))$$

где σ – реальная составляющая проводимости плазмы, E – амплитуда напряженности электрического поля, $R = (d_1 + d_2)/2$ – средний радиус разрядной камеры, μ_0 – магнитная постоянная.

Для выше приведенных параметров самостоятельного газового разряда, величина напряженности магнитного поля, при которой возможно обеспечить однородное распределение плотности зарядов по сечению разрядной камеры должна быть больше $H > 7,5 \cdot 10^3$ А/м.

Таким образом, для выполнения условия инерциальности воздействия для самостоятельного газового разряда частота вращения стабилизирующего вращающегося магнитного поля должна быть больше $\Omega > 7$ кГц, величина напряженности вращающегося магнитного поля, обеспечивающего однородное горение разряда в коаксиальной разрядной камере должна быть больше $H > 7,5 \cdot 10^3$ А/м.

В третьей главе разработана и определены параметры структурной схемы системы стабилизации самостоятельного газового разряда вращающимся магнитным полем.

Показано, что создать вращающееся магнитное поле с требуемыми параметрами (полученные во второй главе оценки напряженности и частоты магнитного поля), возможно с помощью двух систем: спиралевидного индуктора и двухфазной системы катушек. Показано, что наиболее целесообразным с энергетической точки зрения является использование двухфазной системы катушек. Для создания вращающегося поля с помощью данной системы необходимо выполнение двух условий:

- оси катушек должны быть сдвинуты в пространстве друг относительно друга на угол равный 90° ,
- токи, питающие катушки, должны быть сдвинуты по фазе соответственно пространственному смещению катушек.

В состав структурной схемы системы стабилизации входят (рис.1): генератор переменного тока, система фазовращателей, усилители мощности, катушки с ферромагнитными сердечниками.

Разработан источник питания системы стабилизации самостоятельного газового разряда мощностью 60 Вт, позволяющий создавать вращающееся магнитное поле напряженностью до 12000 А/м.

Таким образом, в данной главе определены состав структурной схемы и параметры системы стабилизации самостоятельного газового разряда в коаксиальной камере вращающимся магнитным полем, позволяющие обеспечить требуемую частоту вращения и напряженность стабилизирующего магнитного поля.

В четвертой главе рассмотрены вопросы экспериментального исследования стабилизации самостоятельного газового разряда вращающимся магнитным полем. Структурная схема (рис.2) и параметры экспериментальной установки определялись исходя из численных оценок частоты вращения и напряженности стабилизирующего магнитного поля.

Разрядная камера 1 образована стенками двух коаксиально расположенных кварцевых цилиндров (длина внешней трубки $L_1 = 160$ мм, длина внутренней трубки $L_2 = 250$ мм, диаметр внешней трубки $d_1 = 25$ мм, диаметр внутренней трубки $d_2 = 15$ мм, $l = 150$ мм – расстояние между электродами. Катодом 2, анодом 3 служили кольцевые электроды из алюминия. Поддержание стабильного давления и постоянства химического состава газа осуществлялось системой газоснабжения, состоящей из баллона 4 и насоса 5. В качестве рабочего газа использовался CO_2 . Питание газового разряда осуществлялось источником постоянного тока 6. В разрядную цепь между

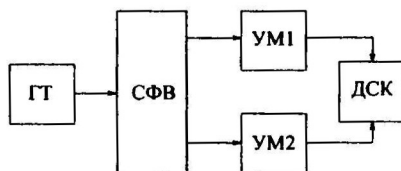


Рис.1. Структурная схема системы стабилизации газового разряда

катодом и источником постоянного тока последовательно подключалось балластное сопротивление $R = 300 \text{ Ом}$. Вращающееся магнитное поле напряженностью до 10^4 А/м и частотой вращения до 20 кГц создавалось при помощи двух катушек 7, оси которых сдвинуты в пространстве друг относительно друга на $\pi/2$. Токи, питающие катушки, сдвинуты по фазе соответственно пространственному смещению катушек. Источник питания магнитной системы стабилизации содержал НЧ генератор 8, систему фазовращателей 9, и два усилителя мощности 10 и 11. Интенсивность свечения газового разряда пропорциональна концентрации электронов. Поэтому степень однородности плазмы газового разряда определялась по интенсивности свечения, регистрируемой установленными по периметру разрядной камеры фотоприемниками 12, сигнал с которых усиливался усилителем 13 и фиксировался запоминающим осциллографом 14. Диаграмма направленности фотоприемников α не превышала поперечные размеры контрагированного разряда ϕ (рис.2,б). Внутренняя трубка коаксиальной разрядной камеры была непрозрачной.

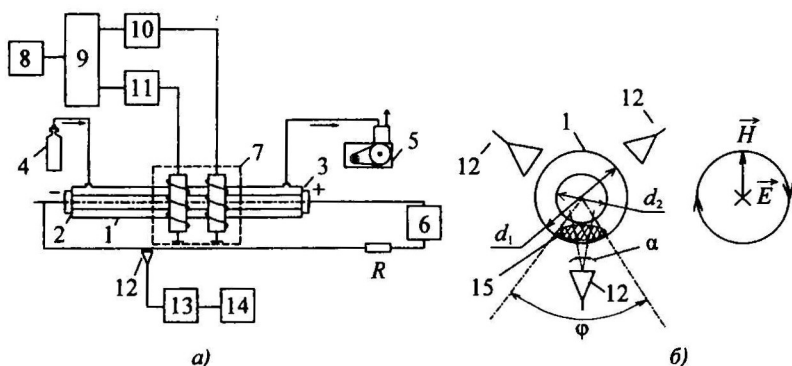


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки (а) и поперечный разрез разрядной камеры (б): ϕ – поперечные размеры контрагированного разряда, α – угол диаграммы направленности фотоприемника, \vec{E} – вектор напряженности электрического поля, \vec{H} – вектор напряженности магнитного поля

При отсутствии внешнего стабилизирующего воздействия разряд был контрагирован и занимал небольшую область в поперечном сечении разрядной камеры $\phi \sim 60^\circ$. С увеличением давления газа поперечные размеры контрагированного разряда уменьшаются. При постоянном давлении газа с увеличением тока разряда поперечные размеры контрагированного разряда менялись незначительно.

При воздействии на плазму вращающимся магнитным полем с частотой $\Omega < 1 \text{ кГц}$ контрагированный газовый разряд вращался в поперечном сечении

коаксиальной разрядной камеры с частотой равной частоте вращения магнитного поля. На выходе фотоприемника наблюдался гармонический сигнал, частота которого совпадала с частотой вращения контрагированного газового разряда (рис.3а). Изменение поперечного размера контрагированного разряда было незначительным. При увеличении частоты вращения магнитного поля наблюдалось уменьшение амплитуды гармонического сигнала на осциллограммах и увеличение поперечных размеров разряда. Таким образом, по изменению амплитуды сигнала с фотоприемников оценивалась степень однородности газового разряда. Регулярный режим поведения, при котором самостоятельный газовый разряд становится однородным и занимает весь разрядный объем наблюдался при частоте вращения стабилизирующего магнитного поля $\Omega = 15$ кГц и напряженности $H > 7,5 \cdot 10^3$ А/м (рис.4, область II). На рис.4 в области I амплитуда напряженности магнитного поля была недостаточна для стабилизации газового разряда, что наблюдалась в эксперименте в виде частичного «размытия» контрагированного разряда в поперечном сечении разрядной камеры.

На осциллограммах наблюдались выбросы (например, рис.3б), которые обусловлены продольными неоднородностями газового разряда – бегущими стратами. Зависимость амплитуды и частоты выбросов от частоты вращения магнитного поля представлены на рис.5. В области I частота выбросов не меняется, газовый разряд контрагирован и вращается в поперечном сечении разрядной камеры. В интервале $5 \text{ кГц} < \Omega < 10 \text{ кГц}$ (область II) амплитуда выбросов начинает снижаться, частота выбросов растет, что обусловлено выполнением условия инерциальности воздействия для части мод. Снижение

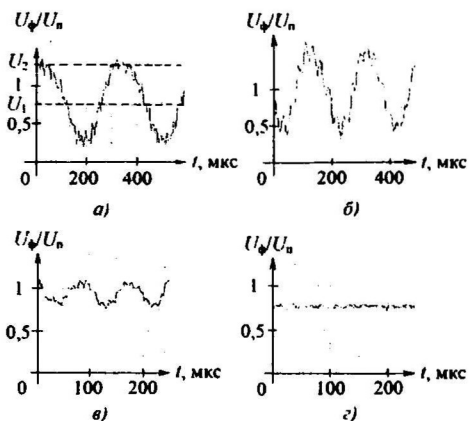


Рис.3. Осциллограммы напряжения с выхода фотоприемника (U_ϕ – напряжение с выхода фотоприемника, U_n – уровень постоянной составляющей напряжения с выхода фотоприемника; $I_{разр} = 0,5$ А, $p = 6$ тор):
а) $\Omega = 3$ кГц; б) $\Omega = 5$ кГц; в) $\Omega = 11$ кГц;
г) $\Omega = 15$ кГц

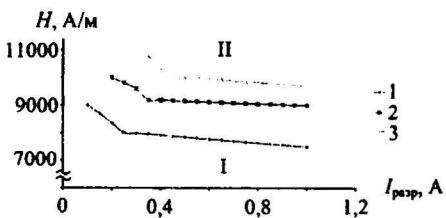


Рис.4. Зависимость напряженности магнитного поля от тока разряда (1 – $p = 2$ тор, 2 – $p = 6$ тор, 3 – $p = 10$ тор)

амплитуды и частоты выбросов (область III) объясняется выполнением условия инерциальности воздействия для мод с характерными временами до $\tau \approx 10^{-4}$ с. В виду параметрических взаимосвязей между модами (области II и III) в плазме происходит перераспределение энергии между модами, и изменение их характерных времен.

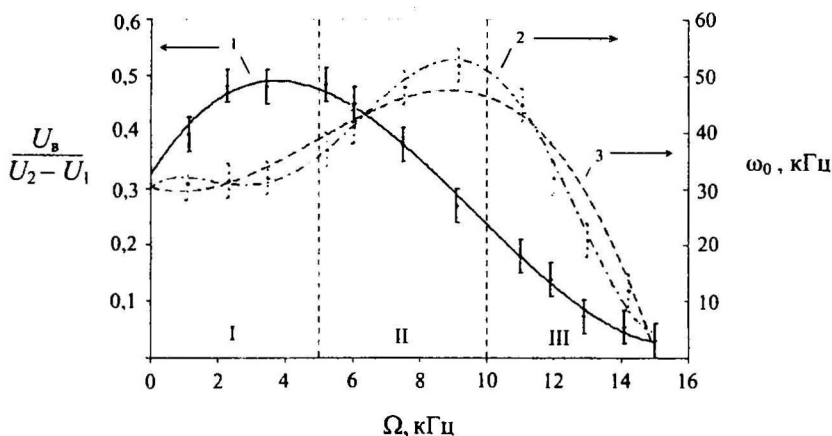


Рис.5. Зависимость нормированной амплитуды и частоты выбросов от частоты вращения магнитного поля (U_b - амплитуда выбросов при воздействии вращающимся магнитным полем, точками обозначены экспериментальные результаты, сплошной линией (1) - аппроксимация полиномом 3-й степени; ω_0 - частота выбросов, пунктиром обозначены - аппроксимация полиномом 5-й (2) и 3-й (3) степени)

С целью определения энергетической эффективности стабилизирующего вращающегося магнитного поля исследовались ВАХ разряда и системы стабилизации. Результаты оценки приведенной мощности стабилизирующего воздействия от тока разряда представлены на рис.6.

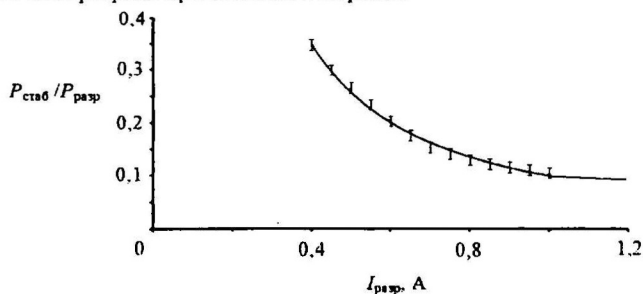


Рис.6. Зависимость приведенной мощности стабилизирующего воздействия от тока разряда ($P_{разр}$ - мощность, вкладываемая в разряд постоянным электрическим полем)

Из рисунка 6 видно, что энергозатраты на стабилизацию плазмы в разрядной камере коаксиальной конфигурации снижаются с ростом тока разряда. Наилучшая энергетическая эффективность внешнего стабилизирующего воздействия ($P_{\text{стб}}/P_{\text{раз}}$) составила 10% при $I_{\text{раз}} \geq 0,8$ А и давлении $p = 10$ тор.

Результаты сравнительного анализа энергетической эффективности различных способов получения и стабилизации газового разряда показали, что удельный энерговклад в газовый разряд при использовании вращающегося магнитного поля (10 Вт/см^3) в качестве стабилизирующего воздействия сравним с энерговкладом, получаемым в несамостоятельном разряде с импульсной предыонизацией при равных мощностях стабилизирующих воздействий. Это говорит о высокой энергетической эффективности динамической стабилизации вращающимся магнитным полем, т.к. применение быстрой прокачки газа, используемой в несамостоятельном разряде с импульсной предыонизацией, требует дополнительного затрата до 50% электрической мощности.

Использование вращающегося магнитного поля в качестве стабилизирующего воздействия в разрядной камере коаксиальной конфигурации позволило уменьшить величину балластного сопротивления, тем самым снизить потери мощности на активном сопротивлении.

Самостоятельный газовый разряд в коаксиальной камере, стабилизированный вращающимся магнитным полем, наиболее целесообразно использовать в технологиях, требующих высоких значений напряженности постоянного электрического поля, а именно: плазмотронах, газоразрядных лампах, в технологии модификации полимерных материалов и некоторых типах газовых лазеров.

Таким образом, разработанная в данной работе система стабилизации самостоятельного газового разряда вращающимся магнитным полем открывает новые возможности практического использования данного типа разряда в технологических процессах и установках.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Главным результатом диссертационной работы является решение важной научно-технической задачи – повышение эффективности метода стабилизации газового разряда в разрядной камере коаксиальной конфигурации вращающимся магнитным полем и выявление областей практического использования данного метода. Достижение цели работы стало возможным благодаря получению следующих основных научных результатов:

1. На базе сопоставительного анализа систем стабилизации газового разряда в разрядных камерах сложной конфигурации показано, что наиболее эффективным является стабилизация электромагнитными полями. В разрядной

камере коаксиальной конфигурации перспективным является использование поперечного вращающегося магнитного поля, с частотой, принадлежащей области инерциальных стабилизирующих воздействий.

2. На базе математической модели самостоятельного газового разряда в разрядной камере коаксиальной конфигурации получены соотношения, позволяющие оценить параметры стабилизирующего вращающегося магнитного поля. Для следующих параметров самостоятельного газового разряда (давление $p = 1 \div 10$ Тор, приведенная напряженность электрического поля $E/p = 5 \div 70$ В/(см·Тор), проводимость $\sigma = 1 \div 30$ мСм) частота вращения стабилизирующего магнитного поля, удовлетворяющая условию инерциальности воздействия, должна быть больше $\Omega > 7$ кГц, величина напряженности магнитного поля $H > 7,5 \cdot 10^3$ А/м.

3. Разработана структурная схема и определены параметры системы стабилизации самостоятельного газового разряда вращающимся магнитным полем в разрядной камере коаксиальной конфигурации.

4. Проведенные экспериментальные исследования стабилизации самостоятельного газового разряда вращающимся магнитным полем подтвердили эффективность системы стабилизации (мощность стабилизирующего воздействия составила порядка 10% от мощности, вкладываемой в разряд). Частота вращения магнитного поля, при которой выполняется условие инерциальности воздействия, для выбранных параметров разряда в коаксиальной разрядной камере, должна быть больше $12 \div 15$ кГц. Максимальный удельный энерговклад в самостоятельный газовый разряд (10 Вт/см³) при использовании вращающегося магнитного поля в качестве стабилизирующего воздействия сравним с энерговкладом, получаемым в несамостоятельном разряде с импульсной предиионизацией.

5. На базе сопоставительного анализа методов стабилизации газового разряда выявлены области их практического применения. Систему стабилизации вращающимся магнитным полем целесообразно использовать в плазмотронах, газоразрядных лампах, технологии поверхностной модификации твердых тел и полимерных материалов.

IV. СПИСОК РАБОТ, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статья в журнале из перечня ВАК РФ и патенты

1. Богослов, Е.А. Стабилизация газового разряда в разрядных камерах сложной конфигурации / Богослов Е.А., Данилаев М.П., Польский Ю.Е. // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2010. - № 1. – С. 65-68.
2. Пат. №61062 РФ, МПК⁷ H01S 3/22. Устройство возбуждения плазмы газового разряда/ Богослов Е.А., Данилаев М.П., Польский Ю.Е.; заявитель и

патентообладатель КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2006132182/22; опублик. 10.02.2007. Бюл. № 4.

3. Пат. №2330363 РФ, МПК⁷ H01S 3/22. Устройство возбуждения плазмы газового разряда / Богослов Е.А., Данилаев М.П., Польский Ю.Е.; заявитель и патентообладатель КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2006132122; опублик. 27.07.2008. Бюл. № 21.

Публикации по материалам научно-технических конференций:

4. Богослов, Е.А. Экспериментальные исследования устойчивости плазмы газового разряда в магнитном поле / Е.А. Богослов, М.П. Данилаев // Труды международной молодежной научной конференции «XIV Туполевские чтения». – Казань, – 2006. – Т. V. – С. 6-7.
5. Богослов, Е.А. Экспериментальные исследования влияния переменного магнитного поля на устойчивость газового разряда в разрядных камерах сложной конфигурации / Е.А. Богослов, М.П. Данилаев, Ю.Е. Польский // Материалы Всероссийской научной студенческой конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам “Научному прогрессу – творчество молодых”. – Йошкар-Ола, 2007. – С.12.
6. Богослов, Е.А. Определение параметров высокочастотной системы накачки газовых лазеров на основе диагностики ее режимов / В.В. Афанасьев, Е.А. Богослов, М.П. Данилаев, Ю.Е. Польский, А.И. Усанов // Труды VI Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессы». – Казань, 2007. – С. 360-361.
7. Богослов, Е.А. Стабилизация плазмы магнитным полем в разрядных камерах сложной конфигурации / Е.А. Богослов, М.П. Данилаев, Ю.Е. Польский, А.И. Усанов // Труды VI Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессы». – Казань, 2007. – С. 361-362.
8. Богослов, Е.А. Стабилизация плазмы газового разряда в разрядных камерах сложной конфигурации / Е.А. Богослов, Ю.Е. Польский // Труды международной молодежной научной конференции «XV Туполевские чтения». – Казань, 2007. – Т. IV. – С.12-13.
9. Богослов, Е.А. Определение результирующей силы, приводящей к контракции газового разряда в разрядных камерах сложной конфигурации / Е.А. Богослов, М.П. Данилаев, Ю.Е. Польский // Труды XIV международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – Москва, 2008. – С. 26-27.
10. Богослов, Е.А. Стабилизация режима работы передатчика для открытых линий оптической связи / В.В. Афанасьев, Е.А. Богослов, М.П. Данилаев, Ю.Е. Польский // Материалы девятой международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций». – Казань, 2008. – С.430-432.

Автор считает своим приятным долгом выразить глубокую благодарность профессору кафедры Радиозлектронных и квантовых устройств Польскому Ю.Е. за участие в постановке задачи, обсуждение научных результатов, постоянную поддержку и внимание в работе над диссертацией.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 1,0. Усл. печ. л. 0,93. Уч. изд. л. 0,98.

Тираж 100. Заказ Н 143.

Типография Издательства Казанского государственного
технического университета
420111, Казань, К.Маркса, 10

